

А.Ф. ЕНИКЕЕВ, канд. техн. наук, УкрГАЗТ (г. Харьков)

И.С. ЗЫКОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИВОДА ПОПЕРЕЧНОЙ ПОДАЧИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

На основе дискретного преобразования Лапласа синтезирован замкнутый канал управления поперечной подачей шлифовального круга.

Постановка проблемы. Внедрение в машиностроительное производство Украины современных информационных и энергосберегающих технологий базируется на разработке технических средств автоматизации технологических процессов и, в частности, алмазного шлифования. Шлифовальные станки при обработке деталей используют в качестве приводных механизмов двигатели постоянного и переменного тока, которые являются энергоемкими объектами управления. Сокращение времени обработки шлифовальными станками деталей при сохранении заданных показателей качества их обработанных поверхностей снижает процент недостатка и дает предприятию существенную экономию электрической энергии [1].

Разработка математической модели привода. При разработке технических средств автоматизации процессов алмазного шлифования используется принцип покоординатного управления станками [2]. В основу разработки замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга положен принцип управления по отклонению. Структурная схема этого канала представлена на рис. 1. Выполним анализ структурной схемы с целью получения выражения для передаточной функции канала.

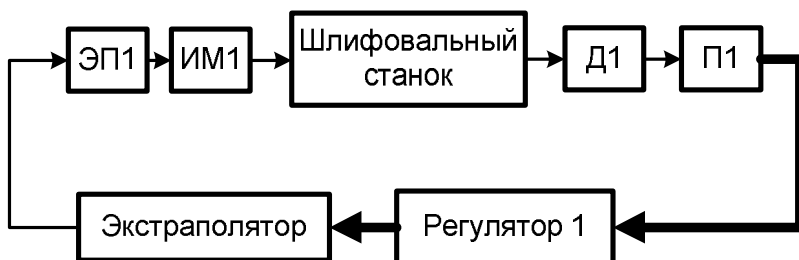


Рис. 1. Структурная схема канала

В динамическом отношении первичный преобразователь представим пропорциональным звеном с некоторой полосой нечувствительности (D_1).

Специфика работы этого блока позволяет представить его аperiodическим звеном с запаздыванием

$$H_1(p) = \frac{D_1 k_{\Pi} e^{-p t_{\Pi}}}{T_{\Pi} p + 1}, \quad (1)$$

где k_{Π} , t_{Π} , T_{Π} – соответственно коэффициент передачи, запаздывание и постоянная времени блока Π .

Погрешность дискретизации аналогового сигнала этим модулем находит свое количественное выражение в нестабильности его выходного кода. На рис. 2 представлена гистограмма разбросов выходного кода. Основные статистические параметры распределения погрешности следующие

$$\bar{X} = 0,84 \cdot 10^{-3}; \quad s = 0,4915; \quad A = 0,0835; \quad E = -0,644.$$

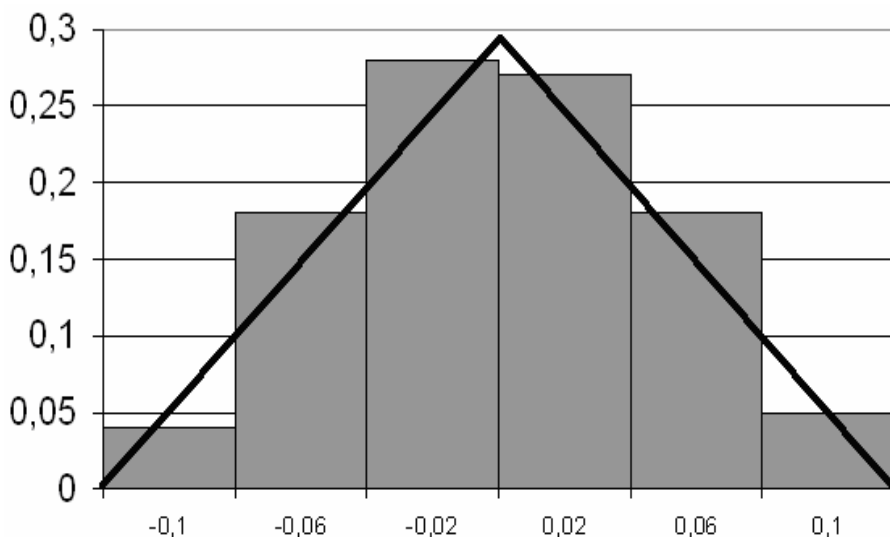


Рис. 2. Гистограмма разброса выходного кода блока Π

Гистограмма после выполнения процедуры сглаживания описана треугольным законом распределения. Вероятность проявления выдвинутой гипотезы по критерию согласия Колмогорова составила 0,918 при $\lambda = 0,487$. Уравнение сглаженной кривой имеет вид

$$f_1(x) = \frac{1}{2s} e^{-\frac{|x|}{s}} \quad \text{при } x \in (-0,12, 0,12). \quad (2)$$

Для полученного закона распределения погрешности модуля, который измеряет величину поперечной подачи шлифовального круга, имеем

$$\ln f_1(x) = -\ln 2s - \frac{|x|}{s}.$$

Отсюда, энтропия погрешности данного модуля

$$H\left\{\frac{x}{x_i}\right\} = \ln(2s e^{\frac{\eta_1}{s}}).$$

Следовательно, энтропийный интервал неопределенности составляет

$$D_1 = s e^{\frac{\eta_1}{s}} = 0,05.$$

Этот интервал определяет полосу нечувствительности входного модуля канала. Выходной сигнал экстраполятора нулевого порядка является ступенчатым. Тогда передаточная функция такого устройства имеет вид [3]

$$H_2(p) = \frac{1 - e^{-pt_r}}{p}. \quad (3)$$

Регулятор 1 построим на базе микроконтроллера. Обобщенная передаточная функция вычислительного блока как некоторого произвольного цифрового фильтра имеет такой вид [3]

$$H_3(p) = \frac{1}{t_r} (1 - e^{-pt_r}). \quad (4)$$

Передаточная функция блоков ЭП1 и ИМ1 получена таком виде

$$H_4(p) = \frac{k_M T_{k1}^2}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (5)$$

где $a_4 = t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} T_{\text{М}}$, $a_3 = T_{\text{М}} [(t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})] + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} T_{\text{Э}} T_{\text{дт}}$;

$$a_2 = T_{\text{М}} [T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} + (t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})] + (t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})$$

$$a_1 = T_{\text{М}} (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) + T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} + (t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}}),$$

$$a_0 = t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}} + T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}}.$$

Блоки П1, Р1 и ЭП1 вносят запаздывание в работу канала для управления поперечной подачей шлифовального круга. Будем считать, что дискретное время запаздывания канала по управляющему воздействию, равное сумме запаздываний указанных блоков, составляет $2T_0$. Соответственно порядок математической модели рассматриваемого канала составляет $d = 3$. С учетом этого запаздывания дискретная передаточная функция замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга получилась в таком виде

$$H_5(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^0 + b_1^0 z^{-1} + b_2^0 z^{-2} + b_3^0 z^{-3}}{1 + a_1^0 z^{-1} + a_2^0 z^{-2} + a_3^0 z^{-3}} = z^{-2} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (6)$$

В основу разработки цифрового регулятора 1 поперечной подачи шлифовального круга положим принцип его синтеза на базе эталонной модели замкнутого канала. Закон управления цифрового регулятора в системах с эталонной моделью имеет такой вид

$$D(z^{-1}) U_t = H(z^{-1}) G_t - F(z^{-1}) y_t, \quad (7)$$

где G_t – задающее воздействие замкнутого канала в момент времени $t = nT_0$;

$D(z^{-1}), H(z^{-1}), F(z^{-1})$ – полиномиальные выражения относительно оператора сдвига.

Структурная схема замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга с цифровым регулятором (7) представлена на рис. 3.

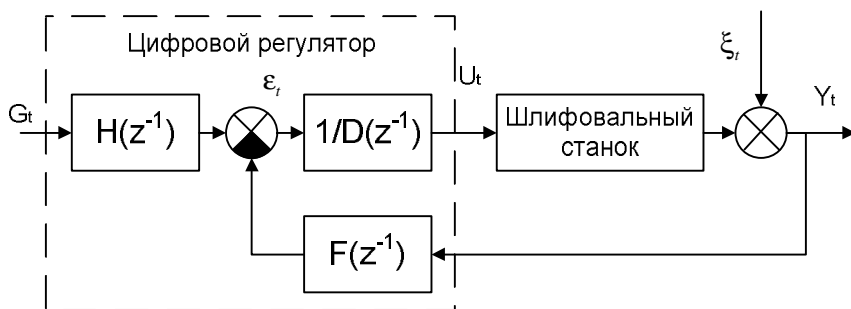


Рис. 3. Структурная схема канала

Синтез цифрового регулятора сведен к задаче определения параметров полиномов $D(z^{-1})$, $H(z^{-1})$ и $F(z^{-1})$ таким образом, чтобы замкнутый основной контур был устойчивым. В условиях неполной входной информации синтез цифрового регулятора 1 выполним на основе минимизации квадратичного критерия оптимальности [3]

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{\infty} [y_i^2 - P_1 U_i^2]. \quad (8)$$

Полином $R_1(z^{-1})$ определяет динамику переходного процесса основного контура цифрового регулятора при устранении ошибки рассогласования.

Поскольку величиной ошибки $e_{\text{доп}}$ можно задаться, а ширина Δ_1 интервала неопределенности уже определена в результате статистической обработки экспериментальных данных, то полином $R_1(z^{-1})$ приобретает такой вид

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4)}{e_{\text{доп}}} z^{-1}. \quad (9)$$

Полином $H(z^{-1})$ имеет вид

$$H(z^{-1}) = z^{-3} (h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3}), \quad (10)$$

где $h_0 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4)}{e_{\text{доп}}} b_0^0$, $h_1 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_1^0}{e_{\text{доп}} a_1^0}$, $h_2 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_2^0}{e_{\text{доп}} a_2^0}$,
 $h_3 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_3^0}{e_{\text{доп}} a_3^0}$.

Полином $F(z^{-1})$ получен в таком виде

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}, \quad (11)$$

где $f_0 = 1$, $f_1 = \frac{a_1^0 + 1}{a_1^0}$, $f_2 = \frac{a_1^0 a_2^0 + a_1^0 + a_2^0}{a_1^0 a_2^0}$.

Полином $D(z^{-1})$ получен в следующем виде

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad (12)$$

где его коэффициенты имеют такие значения

$$g_0 = \frac{b_0^0}{a_0^0}, \quad g_1 = \frac{b_1^0 - \frac{b_0^0 a_1^0}{a_0^0} + \frac{b_0^0 (a_1^0 + 1)}{a_1^0}}{a_0^0},$$

$$g_2 = \frac{b_2^0 + \frac{b_1^0 (a_1^0 + 1)}{a_1^0} + \frac{b_2^0 (a_1^0 a_2^0 + a_1^0 + a_2^0)}{a_1^0 a_2^0} - \frac{b_0^0 a_2^0}{a_0^0} - a_1^0 \left[b_1^0 - \frac{b_0^0 a_1^0}{a_0^0} + \frac{b_0^0 (a_1^0 + 1)}{a_1^0} \right]}{a_0^0}.$$

Передаточная функция оптимального регулятора 1 получена в таком виде

$$H_{\text{опт}}(z^{-1}) = \frac{H(z^{-1})B(z^{-1})}{b_0^0 A(z^{-1}) + D(z^{-1})B(z^{-1})}. \quad (13)$$

После подстановки коэффициентов полиномов $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, $D(z^{-1})$ и $F(z^{-1})$ в выражение (13) и преобразований имеем

$$H_{\text{опт},1}(z^{-1}) = 767,113 \frac{2,3 - 3,453z^{-1} + 1,33z^{-2}}{0,262 + 0,008z^{-1} + 0,2182z^{-2}}. \quad (14)$$

По выражениям (6), (9), (10), (11), (12) и (14) в среде *Matlab* собрана имитационная модель замкнутого канала (рис. 4). График выходного сигнала представлен на рис. 5.

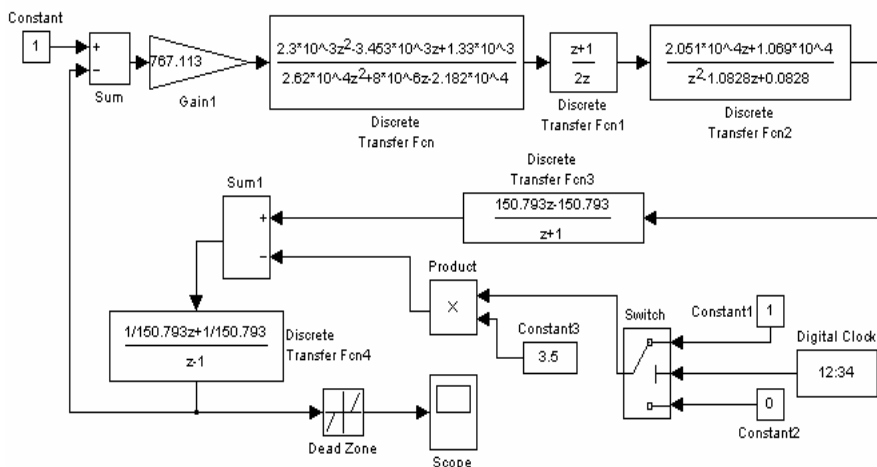


Рис. 4. Имитационная модель в среде *Matlab* замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга

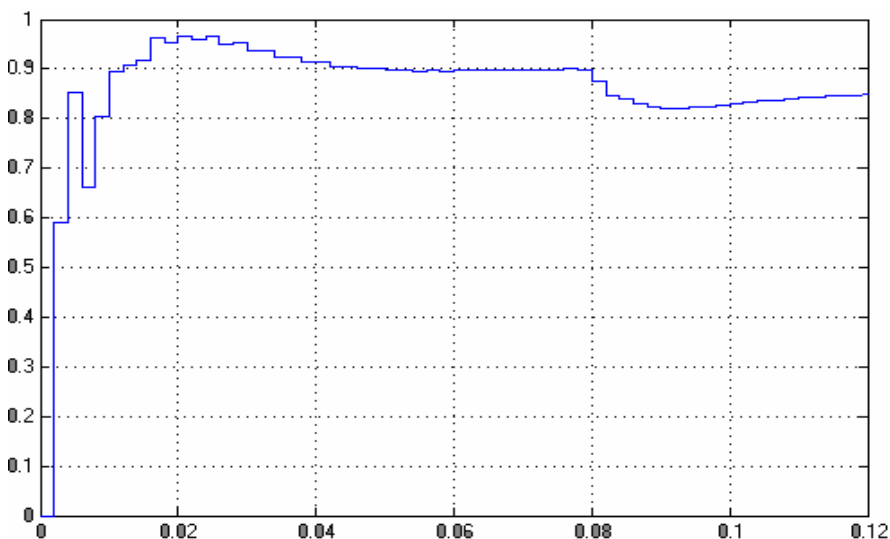


Рис. 5. График выходного сигнала канала

Выводы. На основании анализа графика имеем повышение быстродействия замкнутого канала благодаря цифровому регулятору. Так же просматривается небольшая ошибка перегулирования в начале переходного процесса, которая по истечении некоторого времени становится нулевой. В целом разработанный замкнутый канал удовлетворяет требованиям системы координатного управления шлифовальными станками по точности и быстродействию.

Список литературы: 1. Рубашкин И.Б., Алешин А.А. Микропроцессорное управление режимом металлообработки. – Л.: Машиностроение, 1989. – 160 с. 2. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 3. Романенко В.Д., Игнатенко Б.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ: Учебное пособие. – К.: Вища шк., 1990. – 334 с.

Поступила в редколлегию 13.11. 2008 г.